

Рис. 4. Приклади НФ-структур у відслоненнях, формах рельєфу та карстових порожнинах: а — рифтовий канал печери Кафедрал у ранньоміоценових вапняках, південна Австралія (фото savingnews.com); б — рифтовий канал печери Девілс Хоул, Невада, США (фото Brett Seymour); в — рифтовий канал печери Драгон Бриз у неопротерозойських доломітах, Намібія (фото Namibian ground water systems); г — рифтовий канал печери Армагеддон у архейських доломітах, глибиною до 260 м і довжиною понад 2 км, Південна Африка (фото Joseph Tucker); д — рифтоподібний канал у архейських доломітах, що розкрився у січні 2017 р., Південна Африка (фо-

Але поширення цього трактування на широкий спектр структур у рiзних континентальних геологiчних обставинках, яке часто спостерiгається, вочевидь не виправдано та у багатьох випадках суперечить характеристикам структур.

4.2. Властивостi НФ-структур, суттєвi для генетичної iнтерпретацiї

4.2.1. Розповсюдження

Надзвичайно широке розповсюдження НФ-структур рiзних розмiрних рангiв в осадовому чохлi було лише нещодавно встановлено завдяки розвитку та розширенню площ сейсмiчних дослiджень. Однак структури, що сейс-

то Henk van Hunks); *e* — рифтовий канал печери Азра-3 у юрських вапняках, Марокко (фото з (Audra, 2015)), стрiлкою позначена фiгура людини для масштабу); *ж* — канал, заповнений iнжектитом-пiсковиком, елемент гiдротермального каналового комплексу у ранньоюрських пiсковиках басейну Каро, Пiвденна Африка (фото з (Jamtveit et al., 2004)); *и* — вiдпрепарована трубоподiбна пiсковикова iнтрюзiя у пiсковиках Ентрада, басейн Кодахром, Юта, США (фото з (Ross et al., 2014)); *к* — вiдпрепарованi денудацiєю трубоподiбнi тiла карбонатного матерiалу у раньоеоценових пiсках у районi Варни, Болгарiя (фото з (De Boever et al., 2006)); *л* — труба брекчiй у карбових вапняках Redwall каньйона Колорадо, США (фото з (Wenrich, Sutpin, 1988))

Fig. 4. Examples of TF-structures in outcrops, landforms and karst caves: *a* — rift-like channel of the Cathedral Cave in the Early Miocene limestones, South Australia (photo cavingnews.com); *b* — rift-like channel of Devils Hall Cave, Nevada, USA (photo by Brett Seymour); *в* — rift-like channel of Dragon Breeze cave in Neo-Proterozoic dolomites, Namibia (photo Namibian ground water systems); *г* — rift-like channel of the Armageddon Cave in the Archean Dolomites, up to 260 m deep and over 2 km long, South Africa (photo by Joseph Tucker); *д* — rift-like channel in the Archean Dolomites, opened in January 2017, South Africa (photo by Henk van Hunks); *e* — rift-like channel of Azra-3 cave in Jurassic limestones, Morocco (photo from (Audra, 2015)), an arrow indicates a human figure for scale); *ж* — channel filled with sandstone injection, an element of the hydrothermal channel complex in the Early Jurassic sandstones of the Karoo Basin, South Africa (photo from (Jamtveit et al., 2004)); *и* — exhumed tubular sand intrusion in Entrada sandstones, Kodakhrom Basin, Utah, USA (photo from (Ross et al., 2014)); *к* — exhumed tubular bodies of carbonate material in the Early Eocene sands near Varna, Bulgaria (photo from (De Boever et al., 2006)); *л* — breccia pipe in Carboniferous Redwall limestones in the Colorado Canyon, USA (photo from (Wenrich, Sutpin, 1988))

мічно визначаються, по-перше, в основному залишаються «прихованими» у корпоративних матерiалах, по-друге, часто сприймаються як артефакти i не пiддаються подальшому аналізу та iнтерпретацiї (Cartwright, Santamarina, 2015). Поширення НФ-структур, якi не виявляються стандартними сейсмiчними методами, ймовiрно, багаторазово перевищує розповсюдження сейсмiчно визначених структур. Не буде перебільшенням твердження про те, що НФ-структури мають практично повсюдне поширення та є iнтегральною частиною дренажної системи верхньої частини кори. Хоча iнтенсивнiсть їх розвитку та вплив на флюїдообмiн можуть широко варiювати та рiзко зростати у певних геологiчних та геодинамiчних ситуацiях.

Аналіз лiтератури вказує на бiльш широке розповсюдження НФ-структур у тектонiчно активних обставинках, таких як конвентентнi окраїни, передгiрські прогини, провiнцiї зсуву, рифтовi зони, внутрiшньоплитнi зони тектонiчної активiзацiї. У таких регіонах спостерiгається зосередження явищ, пов'язаних з локалізованими флюїдними розвантаженнями, такими як гiдротермальнi системи, висхiднi розвантаження мiнералізованих глибинних вод i газiв, гiпогенний карст ендегенного типу, флюїдизати, кластичнi iнжектити, грязьовi вулкани, солянi iнтрюзiї, тафонi та сотовi структури (Беленицкая, 2011; Klimchouk, 2017a, b). У локальному та субрегіональному масштабах характерним для НФ-структур та пов'язаних з ними явищ є нерiвномiрне по площi, кластерне поширення (Klimchouk, 2007, 2017a; Cartwright, Santamarina, 2015).

4.2.2. Морфологiя та розмiри

НФ-структури за визначенням є вертикальними чи субвертикальними. За морфологiєю серед них розрiзняються двi основнi групи: 1 — *трубнi*, округлi або овальнi та з порiвнянними розмiрами у горизонтальному перерiзi на рiзних рiвнях; 2 — *лiнiйнi* (трiщино- та рифтоподiбнi), витягнутi по простяганню та за висотою при бiльш-менш сталiй ширинi, малiй у порiвняннi з поперечними розмiрами. Вирiзняються також структури *конусоподiбнi* (перевернутий конус) та *складної морфологiї* — мiнливої за висотою та по простяганню або з мно-

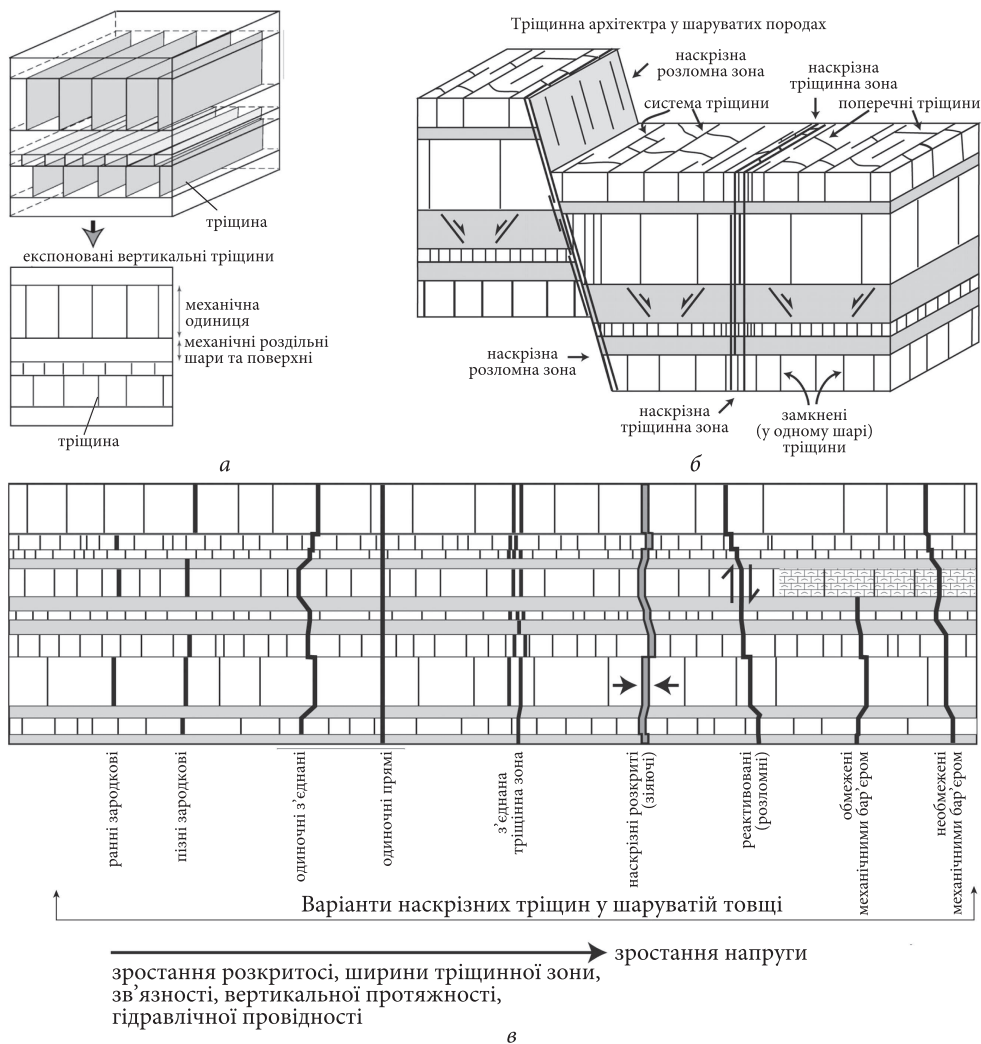


Рис. 5. Концептуальна ілюстрація механічної та тріщинної стратиграфії (а — за (Cooke et al., 2006) та номенклатура наскрізних тріщин (б, в — за (Gross, Eyal, 2007))
Fig. 5. Conceptual illustration of mechanical and fracture stratigraphy (а — form (Cooke et al., 2006) and nomenclature of throughgoing fractures (б, в — form (Gross, Eyal, 2007))

жинними пов'язаними елементами.

За розмірами НФ-структури варіюють у дуже широких діапазонах. Переважна більшість НФ-структур має висоту від кількох десятків метрів до близько 500 м. Однак деякі структури досягають висоти 2000 м (Moss, Cartwright, 2010), канали грязьових вулканів — 5000 м (Korfi, 2002) і навіть понад 10 км (Мамедов, Гулиев, 2003), а кризькорові розломи та розломні зони — 15 км та навіть більших вертикальних розмірів. Поперечні розміри НФ-структур зазвичай знаходяться в межах від кількох метрів до перших сотень метрів, але можуть сягати 500 м (Cartwright, Santamarina, 2015) і навіть кількох кілометрів (Мамедов, Гулиев, 2003). Відношення висоти до діаметра у сейсмічно

визначених трубних структур варіює від 0,8 до 20 (Cartwright, Santamarina, 2015), але у субсейсмічних структур може досягати 50 і більше.

4.2.3. Стратиграфічне положення, положення корневих зон та верхніх замикань

Флюїдопровідна функція НФ-структур багато в чому визначається (крім проникності самих каналів та розподілом тиску) їх розміщенням у вертикальному розрізі, зокрема позицією нижніх («коренів») та верхніх закінчень. Цим визначаються взаємовідношення з флюїдоносними та слабопроникними інтервалами, а отже, умови живлення та розвантаження на закінченнях та умови перетікання між горизонтами

та комплексами, що пересiкаються, а також склад мiгруючих флюїдiв.

Положення в розрiзi найбільш поширених тектоногенних (первинно — розривних) НФ-структур, а також вторинних структур, розвинених за розривними «напрямними», залежить вiд геодинамiчної еволюцiї рeгiону та розподiлу напруг у рiзні перiоди, але в основному контролюється *механiчною стратиграфiєю* (mechanical stratigraphy). Цi фактори спiльно визначають *трiщинну стратиграфiю* (Corbett et al., 1987; Gross et al., 1997; Underwood et al., 2003; Cooke et al., 2006; Laubach et al., 2009). Механiчна стратиграфiя є наслiдком вiдмiнностей у складi, структурах i текстурах порiд шаруватих товщ i подiляє останнi на одиницi за механiчними властивостями, товщиною та властивостями границь. Трiщинна стратиграфiя подроздiляє товщi за розподiлом трiщин у розрiзi та їх атрибутами, залежить вiд механiчної стратиграфiї, але також i вiд iсторiї навантажень та напруг. Тому поняття та подроздiли механiчної та трiщинної стратиграфiї не цiлком збiгаються (Laubach et al., 2009). Одиниця механiчної стратиграфiї представляє один або кiлька шарiв, механiчнi властивостi яких подiбнi та вiдрiзняються вiд сумiжних одиниць. Одиниця трiщинної стратиграфiї представляє один або кiлька шарiв, якi характеризуються подiбними параметрами трiщинуватостi, що вiдрiзняються вiд сумiжних шарiв (рис. 5). Хоча механiчна та трiщинна стратифiкацiї виявляються найбільш яскраво у розподiлi звичайної, переважно внутрiшньопластової, трiщинуватостi, вони також часто контролюють розподiл у розрiзi наскрiзних розривiв (Gross, Eyal, 2007) та розломiв (Ferill et al., 2017), а також сегментiв останнiх. Таким чином, при виявленнi закономірностей розподiлу тектогенних НФ-структур рiзного вертикального розмаху, а також вторинних структур за тектонiчними «напрямними» слiд використовувати принципи та пiдходи механiчної та трiщинної стратиграфiї. Оскiльки розподiл внутрiшньопластових трiщин по товщах багато в чому визначає гiдростратиграфiю рeгiонiв, а розподiл наскрiзних розривiв — вертикальний водообмiн, трiщинна стратиграфiя вiдiграє важливу роль у гiдрогеологiї рeгiонiв.

Найважлившою характеристикою НФ-структур, пов'язаною з їх розмірами та складністю

будови, є наскрiзне вiдношення до пластових структур рiзних рангiв. Крiзькоровi структури масштабiв рифтових зон (поясiв) та океанiчних зон спредингу тут розглядаються не як категорiя НФ-структур, а як областi переважного розвитку останнiх. Їх вклучення до номенклатури НФ-структур недоцiльно через мегамасштаби i складнiсть будови, яка визначається сукупнiстю НФ-структур менших масштабiв, що перетинають певнi iнтервали кори.

У функцiональному вiдношеннi рифтовi зни можна вiднести до СФ-систем О.Ю. Лукина, хоча останнi визначалися автором (Лукин, 2004) як системи менших масштабiв, субординованi трубам дегазацiї П.М. Кропоткiна. Іншi геодинамiчно активнi пояси (активiзованi пасивнi окраїни, активнi окраїни, колiзiйнi) також характеризуються мегамасштабами, але ще й не є сiчними (поперечними), проте вони генерують НФ-структури менших масштабiв i вiдiграють велику роль у мiграцiї флюїдiв.

Крiзькоровi розломи загалом вiдповiдають глибинним розломам, пересiкають земну кору, проникають у мантию та роздiляють кору на глиби. За даними сейсмічних дослiджень бiльшiсть глибинних розломiв затухають у верхах мантиї (тобто мають глибину до 70—100 км), але вирiзняються й такi, що сечуть астеносферу (до глибини 100—300 км) та досягають середньої мантиї (до глибини 400—700 км) (Хаин, 1973). Вони є зонами надходження глибинних флюїдiв до структур чохла, з чим пов'язана їх велика роль у флюїдообмiнi та накладеному лiтогенезi.

Крiзькоровi розломи є зазвичай складними структурами, будова яких у чохлi визначається сукупнiстю НФ-структур менших масштабiв i рiзного походження, якi переважно розглядаються у цiй статтi.

Крiзьчохольнi НФ-структури сiчуть весь осадовий чохол до фундаменту i зазвичай приуроченi до зон глибинних розломiв. На прикладi Пiвденно-Каспiйської западини такi структури розглядаються як великi, що характеризуються поперечними розмірами 3—4 км та висотою вiд 8—10 до 20 км (Мамедов, Гулиев, 2003).

Крiзьформацiйнi НФ-структури перетинають значнi iнтервали чохла, що охоплюють одну або кiлька формацiй. Їм приблизно вiд-

повідать субвертикальні геологічні тіла середньої розмірної категорії, що характеризуються розмірами від десятків до сотень метрів у поперечнику та від перших сотень метрів до кілометра по вертикалі.

Крізьсвітні НФ-структури перетинають одну або кілька стратиграфічних світ і характеризуються типовими розмірами від кількох метрів у поперечнику та від кількох десятків до сотень метрів по вертикалі.

Крізьпластові НФ-структури перетинають один або кілька пластів і зазвичай відповідають елементарним великим тріщинам, порожнинам або іншим геологічним тілам з поперечними розмірами від дециметрів до декількох метрів і вертикальними розмірами від кількох метрів до перших сотень метрів. Внутрішньопластові структури не є наскрізними і тут не розглядаються.

Характер і положення корневих зон та верхніх замикань, хоча нечасто визначаються сейсмічними дослідженнями або прямими спостереженнями, мають велике значення для інтерпретації походження та гідрогеологічної функції НФ-структур. Кореневі зони можуть асоціюватися з джерелом флюїдів, що дає додаткову інформацію про склад останніх та можливі процеси ініціювання та розвитку структур. Неглибоко розташовані кореневі зони в регіональних водоносних горизонтах та комплексах можуть вказувати на наявність АВТ та ймовірність флюїдодинамічних механізмів формування НФ-структур (Carthwright, Santamarina, 2015). Глибоке положення корневих зон передбачає участь термальних глибинних флюїдів відповідного складу та глибинних механізмів формування тисків. Положення корневих зон у межах карбонатних або евапоритових товщ вказує на ймовірність механізму формування НФ-структур обваленням великих карстових порожнин і висхідною міграцією порушеної зони. Прикладами можуть бути закладення коренів сотень труб брекчій на рівні карбонатних вапняків у районі Великого Каньйону на плато Колорадо (США) (Wenrich, Sutpin, 1988) або закладення коренів численних сейсмічних труб на рівні нижньоміоценової карбонатної товщі у масиві Донгша (найбільшому офшорному вуглеводневому родовищі Китаю) у Південно-Китайському морі (Sun et al., 2013) (див. рис. 2, *e* і *ж*).

Положення верхніх замикань зазвичай вказує на горизонт розсіювання тисків (при висхідних потоках) і наявність вищезалігаючого шару-ізолятора зі зниженою тріщинною або матриксною проникністю.

НФ-структури можуть бути відкритими на поверхню або морське дно — в останньому випадку вони часто вінчаються провальними шахтами, воронками-покмарками або конусами відкладів розвантаження. Вертикально накладені форми (покмарки або конуси відкладів) на вершині наскрізної структури свідчать про епізодичність її флюїдної активності (Carthwright, Santamarina, 2015). Проте увігнутість шарів у вищезалігаючій товщі може бути пов'язана і з провалью-просадочним просуванням структури. Наявність конусів, складених екструдованими осадами, вказує на функціонування «осадового» вулкану (грязьового або піщаного) та дію механізму флюїдизації.

4.2.4. Літостратиграфія вміщуючих товщ, що перетинаються

Будова і склад товщ, які перетинаються НФ-структурами, різноманітні і багато в чому визначають ймовірність тих чи інших механізмів розвитку структур. Більшість публікацій, що присвячені сейсмічним структурам, відносяться до морських акваторій, де такі товщі часто складені молодими слабкоконсолідованими осадами, для яких добре підходять зазвичай запропоновані флюїдопроривні механізми формування НФ-структур. Проте характерною проблемою багатьох публікацій є відсутність виразної літостратиграфічної характеристики розрізів, що обмежує можливості генетичного аналізу.

Механізми флюїдизації осадів корневих зон і товщ, що перетинаються, нерідко пропонуються і для районів, де в розрізах присутні також консолідовані породи, наприклад пісковики, різноманітні сланці, вапняки, для яких прийнятність таких механізмів обмежена або сумнівна і вимагає спеціального обґрунтування. Навіть у разі явних структур флюїдодинамічного походження, наприклад каналів грязьових вулканів у переважно глинистих товщах, потрібне спеціальне обґрунтування механізмів їх проникнення через часто присутні у цих товщах окремі шари скельних порід.

4.2.5. Речовинний склад заповнення

НФ-структури можуть бути *впровадженими* (інтрузії), *заповненими* ремобілізованими (інжекти) або хімічними осадами та *порожністими* (не заповнені твердими або пухкими осадами). Для структур флюїодинамічного походження передбачається безпосереднє впровадження стороннього матеріалу в товщу, що перетинається (соляні або магматичні інтрузії), або негайне чи подальше заповнення первинних флюїдорозривів і вторинних порожнистих каналів флюїдизованими кластичними осадами. У цих випадках речовинний склад наскрізних геологічних тіл визначається складом самих інтрузій чи залежить від складу мобілізованих осадів та режиму транспортування та осадження. Серед структур-інжектитів переважають піщані (пісковикові) та глинисті. Структури гідротермальних систем, пов'язаних із магматичними інтрузіями, часто заповнені рудними матеріалами.

НФ-структури первинного тектонічного походження зазвичай заповнюються частково або повністю мінеральними масами, відкладеними флюїдами, що мігрують по цих структурах. Склад мінералізуючих мас різноманітний залежно від складу мігруючих флюїдів, процесів взаємодії з вміщувачими породами і фізико-хімічних умов у відповідних інтервалах. Карстові структури розчинення також часто заповнюються хомогенними та кластичними осадами. Карстово-провальні структури заповнені брекчіями різного складу, який залежить від складу товщ, що перетинаються, та часто цементуються флюїдогенними мінеральними масами.

Вивчення матеріалів заповнювача, а також зон зміни порід навколо каналів НФ-структур надає важливу інформацію про їх походження та режим розвитку. Дослідження флюїдних включень та складу мінерального заповнювача, особливо мікрокомпонентів та ізотопного складу, дозволяє встановити походження флюїдів, їх температуру та інші фізико-хімічні умови, а також виявити етапи флюїдної тектонічної активності (Dublyansky et al., 2014; Craddock et al., 2021; Klimchouk et al., 2021; Spötl et al., 2021). Склад кластичного заповнювача інжектитів вказує на джерело та напрямок перенесення флюїдизованого матеріалу, а особливос-

ті структури та текстури — на гідродинамічний режим перенесення та осадження (Ross et al., 2014). Склад брекчій у трубах дозволяє співвідносити їх зі стратиграфічними одиницями походження та виявляти особливості процесу обвалення.

Заповнення НФ-структур зменшує їхню флюїдопровідну функцію, але їх проникність часто залишається такою, що набагато перевищує проникність матриці вміщувачих порід. Тому такі структури можуть залишатися каналами переважної флюїдної міграції протягом тривалих геологічних періодів. Разом з тим мінералізація нерідко призводить до фосилізації (втрати флюїдопровідних властивостей) НФ-структур.

4.2.6. Час утворення

Датування різними методами заповнювача та конусів пригірлових відкладів дозволяє встановити мінімальний вік структур та час відповідних періодів флюїдної активності (Wendt et al., 2019; Craddock et al., 2021), але не час утворення самих структур, який може значно передувати заповненню. Разом з тим прямі датування часу утворення та етапів еволюції НФ-структур нечисленні та відсутні для структур, що виявляються за сейсмічними даними (Cartwright, Santamaria, 2015). Аналіз різних геологічних характеристик і співвідношень НФ-структур із вміщувачими товщами вказує на широкий діапазон віків самих структур і періодів їх заповнення — від конседиментаційного утворення до накладеного через мільйони років після утворення вміщувачих порід.

4.3. Механізми утворення та розвитку початкових неоднорідностей

Утворення НФ-структур пов'язується у міжнародній літературі з різними процесами, огляди яких висвітлено у роботах (Huse et al., 2010; Andresen, 2012; Cartwright, Santamarina, 2015; Wheatley et al., 2016). Проте основну увагу в них приділено флюїодинамічним механізмам, з дотичним чи відсутнім розглядом інших.

Крихка деформація є основним механізмом виникнення *тектонічних розривів* та *гідророзривів*; перших — унаслідок тектонічних, других — у результаті гідравлічних напруг. *Обвалення порожнин* також відбувається шляхом

крихкої деформації — під дією літостатичного тиску та сил гравітації. Хоча фізичні механізми тектонічних розривів, гідравлічних розривів і розривних деформацій при обрушенні порожнин подібні, вони розглядаються як різні геологічні механізми через відмінності у природі напруг та геологічних умов реалізації.

Формуванню тектонічних розривів присвячена численна література. Вони можуть отримувати значне (сантиметри-дециметри) початкове розкриття, яке може отримувати подальшу трансформацію та/або заповнюватись осадами *in situ* або впровадженими матеріалами.

Гідророзриви найчастіше приймаються основним механізмом утворення НФ-структур (Cartwright et al., 2007; Løseth et al., 2011; Wheatley et al., 2016 та ін.). У цьому механізмі АВТ у «кореневій» зоні викликає гідравлічне тріщиноутворення у перекриваючих породах, яке поширюється до поверхні перпендикулярно до мінімальної напруги і створює первинну структуру підвищеної проникності. Необхідний як початкова умова АВТ може створюватися різними процесами: гідродинамічними, діагенетичними, швидким гляціальним навантаженням, швидким накопиченням евапоритів, гідротермалізмом, впровадженням глибинних флюїдів та ін. Природне гідравлічне тріщиноутворення є, вірогідно, циклічним процесом унаслідок такого характеру нарощування порового тиску, який періодично скидається проривом флюїдів з подальшим закриттям тріщин (Hurst et al., 2003a).

Однак прийнятність гідравлічного тріщиноутворення як основного механізму утворення НФ-структур викликає сумніви. По-перше, добре сейсмічно визначені кореневі зони труб у багатьох випадках не відповідають звичайним областям формування АВТ, таким як структурні замикання антикліналей або висхідні виклинювання горизонтів, а закладені в синклінальних пониженнях або пологонахилених структурах без структурних замикань (Cartwright, Santamarina, 2015). По-друге, модель гідравлічного тріщиноутворення не узгоджується з чіткою трубною морфологією багатьох НФ-структур висотою у багато сотень метрів та співвідношенням висоти до ширини до 20 (Cartwright, Santamarina, 2015) чи більше. Цьому механізму також не відповідає морфологія та масштаби рифтоподібних структур,

які можуть мати поздовжні та вертикальні розміри у сотні метрів. По-третє, для здійснення ін'єкцій флюїдизованого кластичного матеріалу, наприклад піску об'ємом у тисячі м³ і висотою в сотні метрів, для гідравлічного тріщиноутворення знадобилися б нереалістично високі тиски і градієнти тисків між кореневою зоною і верхніми замиканнями структур (Hurst et al., 2003a). Разом з тим гідравлічне тріщиноутворення може бути ініціюючим механізмом, що відкриває шляхи локалізованого флюїдообміну і подальшого формування трубних структур за участю розчинення та інших процесів.

Розрідження (liquefaction) і *флюїдизація* розглядаються як основні процеси формування кластичних інжективів (Huuse et al., 2005; Ross et al., 2014; Wheatley et al., 2019; Karstens 2019 та ін.). Розрідження визначається як тимчасова або раптова втрата зчеплення між зернами внаслідок різкого збільшення порового тиску флюїдів до рівня, що дорівнює тиску перекриваючих осадів (Owen, 1987). Процес характеризується різким руйнуванням метастабільного пухкоупакованого каркасу, з переходом зерен у зважений у поровому флюїді стан (Lowe, 1975). Флюїдизація виникає при висхідній течії флюїдів через осад, що створює силу, яка долає силу зчеплення зерен (Owen, 1987) і зважує останні.

Капілярне впровадження газів також розглядається як механізм утворення сейсмічних труб там, де коренева зона генерує вільну газову фазу (Liu, Flemings, 2006; Cathles et al., 2010). Газ, захоплений капілярною обляміркою, накопичується до критичної потужності, коли сили впливання проштовхують газ через пори з формуванням газової колони, що просувається як поршень і заміщує рідину в порах (Cathles et al., 2010).

Гравітаційне обвалення порожнин може супроводжуватися міграцією зони та порожнини обвалення вгору по розрізу із формуванням труб брекчій. Утворення порожнин, що ініціює на певній стадії процес обвалення, зазвичай пов'язується з розчиненням порід (карстом), але іноді згадуються інші процеси втрати об'єму, зокрема дисоціація гідратів (Cartwright, Santamarina, 2015).

Деякі дослідники вважають, що формування труб провальним механізмом не потребує руху флюїдів (Cartwright, Santamarina, 2015) їх

табл. 2). Насправдi обвалення покрiвлi порожнини супроводжується розущiльненням породи, при якому об'єм порушеної маси iстотно перевищує об'єм вихiдної породи. Це призводить до зменшення порожнини над колоною обрушення, яка росте вверх, та самозупинцi висхiдного просування вершини труби брекчiй. Тому зростання колони обвалення на значну висоту вимагає часткового видалення обваленого матерiалу флюїдними процесами — розчиненням, флюїдизацiєю та iн. (Huntoon, 1996; Klimchouk, Andrejchuk, 1996). Мiграцiя вершини труби вверх у стратифiкованому розрiзi супроводжується взаємодiєю її флюїдiв з рiзними породами i водоносними горизонтами, що створює можливiсть реалiзацiї рiзних флюїдних процесiв, якi пiдтримують подальше зростання труби гравitaцiйним обваленням.

5. Роль НФ-структур у флюїдообмiнi

Гiдрогеологiя осадового чохла багато в чому контролюється шаруватими неоднорiдностями проникностi, зокрема наявністю слабопроникних iзолюючих iнтервалiв. НФ-структури за визначенням є сiчними по вiдношенню, у тому числi, до iзолюючих iнтервалiв i, як правило, вiдрiзняються набагато вищою проникностiю у порiвнянні з вмищуючими породами, принаймнi на певних етапах своєї еволюцiї. Цим визначається їхня ключова роль у флюїдообмiнi, включно з мiграцiєю вуглеводнiв i забруднювачiв. Локалiзований по НФ-структурах вертикальний флюїдообмiн через латеральнi лiтологiчнi та гiдродинамiчнi межi супроводжується взаємодiєю каналових флюїдiв з вмищуючими породами i пластовими водами горизонтiв, що пересiкаються, викликає формування термальних i геохимiчних аномалiй, порушення рiвноважного стану системи «вода—порода» та рiзнi перетворення. Цим визначається провiдна роль НФ-структур у накладеному лiтогенезi та утвореннi рудних тiл.

Флюїдопровiдна здатнiсть НФ-структур є мiнливою у часi i залежить вiд стадiйностi їх формування та вторинних змiн, тому порiвняння такої здатностi мiж морфогенетичними типами НФ-структур є загалом утрудненим. Проте очевидно, що найбільш ефективними є структури карстового походження, у форму-

ванні яких задiяний механiзм зворотного зв'язку мiж ростом розкриття i витратою потокiв i якi характеризуються найбільшими розмiрами порожнин. Гiпогенний карстогенез посилює аномальнiсть гiдродинамiчних, геотермодинамiчних та геохимiчних параметрiв у зонах НФ-структур та сприяє бiльш iнтенсивному перебiгу флюїд-породних взаємодiй (Климчук и др., 2013; Климчук, 2017).

Флюїдна активнiсть НФ-структур зазвичай має виражений iмпульсний характер, iнодi циклiчний, що пов'язано з змiнами граничних умов унаслідок циклiчностi процесiв флюїдо-лiтогенетичної самоорганiзацiї осадових басейнiв (Ortoleva, 1994), тектонiчних подiй та змiн напруженого стану порiд, проривiв флюїдiв через iзолятори та iн. Найбiльшi проникнiсть та iнтенсивнiсть флюїдних потокiв каналами НФ-структур флюїдодинамiчного типу характернi для перiодiв пiд час i безпосередньо пiсля їх формування та в перiоди активiзацiї, якi зазвичай пов'язанi з тектонiчними подiями.

Великi НФ-структури найбільшого стратиграфiчного охоплення (крiзьформацiйнi, крiзьчохольнi) завжди мають складну будову, яка включає рiзнi за генезою, морфологiєю та гiдравлiчними властивостями сегменти на рiзних рiвнях розрiзу. Крім того, вертикальнi сегменти НФ-структур перетинають рiзнi гiдростратиграфiчнi одиницi та гiдродинамiчнi межi. Цими обставинами визначаються вiдмiнностi у флюїдопровiднiй функцiї вертикальних сегментiв у межах навлi однiєї НФ-структури. Рiзкi змiни гiдродинамiчних умов, викликанi, наприклад, гiдророзривом або проривами через слабопроникнi шари внаслідок провалу покрiвлi порожнин i проникненням колони обвалення, можуть спричиняти iмпульси iнтенсивностi флюїдних потокiв в одному або кількох сегментах НФ-структур, але не виявлятися суттєво в iнших сегментах.

Найбiльша флюїдопровiдна ефективнiсть НФ-структур характерна для територiй, що знаходяться в режимi розтягування, а також охоплених гiдротермальними системами — фiльтруючими термогiдроколонами (Поспелов, 1962). Цi ефекти тiсно пов'язанi з мантiйними процесами, що визначають розподiл та iнтенсивнiсть процесiв дегазацiї Землi та їх вплив на дренажну систему у жорсткiй корi (Шестопалов та iн., 2018).

6. Роль НФ-структур у літогенезі та еволюції осадових басейнів

Наскрізний по вертикалі характер НФ-структур та їх флюїдопровідна функція зумовлюють відповідну локалізацію накладених геохімічних процесів і формування виражених флюїдодинамічних парагенезів (Лукин, 1989, 2004; Machel, 1999; Davies, Smith, 2006; Smith, Davies, 2009; Тимурзиев, 2009; Беленицкая, 2011). У роботі (Лукин, 2004) підкреслюється провідна роль різнорівневих глибинних флюїдів, термодинамічні властивості яких визначають потенціал для вторинних процесів у межах кризь-формаційних систем — труб дегазації. *«Саме вони зумовлюють різноманітні накладені гідрогенні перетворення та новоутворення, з якими пов'язані основні діагностичні геолого-геофізичні ознаки цих систем»* (Лукин, 2004, с. 37) (пер. наш. — О.К.). Іншим важливим фактором, що впливає на роль НФ-структур у літогенезі, є здатність геодинамічних напруг «стягуватися на найбільш динамічну масу» (Поспелов, 1963), що сприяє інтенсивним різноманітним процесам метасоматозу. *«Інтенсивній метасоматичній переробці порід з мобілізацією та перерозподілом різноманітних дисперсних компонентів сприяють процеси тектоно-сейсмічної активізації, які в силу зазначених особливостей геодинамічного режиму повинні виявлятися саме в межах КФ-систем та труб дегазації»* (Лукин, 2004, с. 43) (пер. наш. — О.К.).

Останніми десятиліттями стосовно флюїдогенних перетворень, локалізованих за НФ-структурами, спостерігається широке використання ряду споріднених термінів-концепцій: *гіпогенний алогенез* (накладені зміни, зумовлені гіпогенними факторами) (Лукин, 2004, 2014); *накладений літогенез* (зміни осадових порід, які зумовлені міграцією не за їх напластуванням) (Леонов, Волож, 2004; Япаскурт, 2005); *«наскрізні» обстановки діагенезу* (Machel, 1999); *флюїдний літогенез* (Беленицкая, 2011; Лукин, 2014).

Накладений літогенез, пов'язаний з НФ-структурами, зазвичай є локальним, тобто реалізується на відміну від фонового літогенезу у межах невеликих ділянок, прилеглих до структур. Разом з тим він може поширюватися по латералі і на значні відстані від НФ-структур

по стратиформних інтервалах високої проникності. Основними процесами є розчинення, осадження (цементация) та метасоматоз. Прояви накладеного літогенезу різноманітні і включають різні метасоматити, зони «фантомізації» (облямівки «примарних» порід) (Quinif, Bruxelles, 2011; Dubois et al., 2014), різноманітну гідротермальну мінералізацію та рудні тіла, доломітизацію (Davies, Smith, 2006; Smith, Davies, 2009). Накладений літогенез, пов'язаний із НФ-структурами, посилює неоднорідності, що формуються в осадових басейнах механізмами самоорганізації (Ortoleva, 1994). У регіонах, які знаходяться в режимі розтягування, а також охоплених гідротермальними системами, накладений літогенез, пов'язаний із глибинною дегазацією Землі та дренажною системою НФ-структур, дуже впливає на еволюцію осадових басейнів (Лукин, 2018).

7. Висновки

Головними глобальними факторами формування флюїдогеологічних аномалій є дегазація Землі та взаємодія флюїдних систем різного походження, які переважно забезпечуються наскрізними флюїдопровідними структурами різної природи, розміру та будови, що утворюють дренажну систему верхньої кори.

НФ-структури мають практично повсюдне поширення і є інтегральною частиною дренажної системи верхньої кори, хоча інтенсивність їх розповсюдження та вплив на флюїдообмін широко варіюють та різко зростають у певних геологічних та геодинамічних обстановках. У локальному та субрегіональному масштабах НФ-структури та пов'язані з ними явища демонструють нерівномірне по площі, кластерне поширення.

Ключова роль НФ-структур у флюїдообміні, включно з міграцією вуглеводнів і забруднювачів, визначається їх перетинаючим і наскрізним характером по відношенню до шаруватих неоднорідностей, у тому числі до ізолюючих інтервалів, та зазвичай набагато вищою проникністю у порівнянні з вміщуючими породами. Наскрізний по вертикалі характер НФ-структур та локалізований вздовж них вертикальний флюїдообмін через латеральні літологічні та гідродинамічні межі супроводжується

взаємодiєю каналових флюїдiв з вмищувачими породами та пластовими водами, викликає формування термальних i геохімічних аномалій, порушення рiвноважного стану системи «вода—порода» i рiзнi перетворення самих наскрiзних каналiв та порiд, що їх вмищують. Цим визначається провiдна роль НФ-структур у накладеному лiтогенезi та руднiй мiнералiзацiї. Бiльшiсть локалiзованих накладених змiн гiрськопородних масивiв та проявiв рiзноманiтної мiнералiзацiї, включно з родовищами, утворенi пiд дiєю сфокусованої мiграцiї флюїдiв, тобто є геологічними проявами аномальних гiдрогеологічних процесiв.

Флюїдопровiдна здатнiсть НФ-структур залежить вiд походження, а також вiд стадiйностi їх формування та вторинних змiн, а тому мiнлива у часi. У зв'язку з цим порiвняння такої здатностi мiж морфогенетичними видами НФ-структур є загалом утрудненим, хоча найбiльш ефективними у цьому вiдношеннi є структури карстового походження. Для НФ-структур флюїдодинамічного типу найбiльшi проникнiсть та iнтенсивнiсть флюїдних пото-

кiв по каналах характернi для перiодiв їх формування та безпосередньо пiсля них, а також у перiоди активiзацiї, що зазвичай пов'язанi з тектонiчними подiями.

Дослiдження виконано в рамках держбюджетної теми Інституту геологічних НАН України «Аномальні зони та процеси в гiдрогеологічних структурах» (2018—2021 рр., ДР № 0117U004155) за цiльовою програмою наукових дослiджень Вiддiлення наук про Землю НАН України «Розвиток геологічних, геофізичних наук, технологiй i нарощування ресурсiв корисних копалин в Україні та вивчення, прогнозування i мiнiмiзацiя надзвичайних ситуацiй» та теми прiоритетних наукових дослiджень i науково-технічних (експериментальних) розробок Вiддiлення наук про Землю НАН України «Геологічні дослiдження для пом'якшення та адаптацiї до змiни клімату в Україні (2022—2023 рр.).

Автор висловлює вдячнiсть академіку НАН України В.М. Шестопалову за важливі поради при пiдготовцi рукопису та доктору геологічних наук О.Л. Шевченку за конструктивнi зауваження, якi допомогли вдосконалити виклад матерiалу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Беленицкая Г.А. «Флюидное» направление литологии: состояние, объекты, задачи. *Ученые зап. Казан. ун-та.* 2011. № 153(4). С. 97—113.
- Геологический словарь.* В 2-х т. Под ред. К.Н. Паффенгольца и др. Москва: Недра, 1973.
- Геологический словарь.* В 3-х т. Изд. 3-е, перераб. и доп. Под ред. О.В. Петрова. Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010-2012.
- Климчук О.Б. Развитие теории гипогенного карстогенезу: наукові та практичні застосування. *Вісн. НАН України.* 2017. № 11. С. 1—19. <http://doi.org/10.15407/visn2017.11.009>
- Климчук А.Б., Тимохина Е.И., Амеличев Г.Н., Дублянский Ю.В., Шпетль К. Гипогенный карст Предгорного Крыма и его геоморфологическая роль. Симферополь: ДИАИПИ, 2013.
- Кропоткин П.Н. Дегазация Земли и генезис углеводородов. *Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева.* 1986. № 5. С. 540—547.
- Леонов Ю.Г., Волож Ю.А. (ред.). Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция. Москва: Науч. мир, 2004.
- Лукин А.Е. Литогеодинамические факторы нефтегазоаккумуляции в авлакогенных бассейнах; автореф. дис ... д-ра геол.-мин. наук. Киев, 1989. 42 с.
- Лукин А.Е. О сквозьформационных флюидопроводящих системах в нефтегазоносных бассейнах. *Геол. журн.* 2004. № 3 (309). С. 35—45.
- Лукин А.Е. Флюидный литогенез — важнейшее направление литологических исследований в XXI ст. *Геол. журн.* 2014. № 4 (349). С. 27—42.
- Лукин А.Е. Консидерационные процессы глубинной дегазации Земли и их роль в формировании бассейнов породообразования. *Очерки дегазации Земли: Шестопалов В.М. (ред.).* Киев, 2018. С. 124—186.
- Махлаев Л.В., Голубева И.И. Флюидизаты требуют внимания. *Природа.* 2001. № 9. С. 59—68.
- Мамедов П.З., Гулиев И.С. Субвертикальные геологические тела в осадочном чехле Южно-Каспийской впадины. *Изв. АН Азербайджана. Науки о Земле.* 2003. № 3. С. 139—146.
- Поспелов Г.Л. Строение и развитие фильтрующихся гидротермальных рудообразующих систем. *Геология и геофизика.* 1962. Ч. 1, № 11. С. 28—40; Ч. 2, № 12. С. 40—57.
- Поспелов Г.Л. Геологические предпосылки к физике рудоконтролирующих флюидопроводников. *Геология и геофизика.* 1963. № 3. С. 18—38.
- Хаин В.Е. Общая геотектоника. Москва: Недра, 1973.

- Шестопалов В.М., Лукин А.Е., Згонник В.А., Макаренко А.Н., Ларин Н.В., Богуславский А.С. Очерки дегазации Земли. Киев, 2018.
- Япаскерт О.В. Аспекты теории постседиментационного литогенеза. *Литосфера*. 2005. № 3. С. 3—30.
- Andresen K.J. Fluid flow features in hydrocarbon plumbing systems: What do they tell us about the basin evolution? *Marine Geology*, 2012, 332-33: 89-108.
- Audra Ph. Explorations 2013-2014 en Algérie Tébessa et massif de l'Azrou. *Spelunca*, 137: P. 39-44.
- Braccini E., de Boer W., Hurst A., Huuse M., Vigorito M., Templeton G. 2008. Sand injectites. *Schlumberger Oilfield Review*, 2015, 20 (2): 34-49.
- Broughton P.L. Salt dissolution tectonism and spatiotemporal aspects of juxtaposed sinkholes and pseudo-sinkholes of the Foreland Alberta Basin, Canada. U.S. Geological Survey Karst Interest Group Proceedings. 2021: 86-96.
- Cartwright J., Huuse M., Aplin A. Seal bypass systems. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 2007, 91: 1141-1166. <http://doi.org/10.1306/04090705181>
- Cartwright J.A., Santamarina C. Seismic characteristics of fluid escape pipes in sedimentary basins: Implications for pipe genesis. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 65: 126-140. <http://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.03.023>
- Cathles L.M., Su Z., Chen, D. The physics of gas chimney and pockmark formation, with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27 (1): 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.09.010>
- Chan M., Netoff D., Blakey R., Kocurek G., Alvarez W. Clastic-injection pipes and syndepositional deformation structures in Jurassic eolian deposits: Examples from the Colorado Plateau. In: A. Hurst and J. Cartwright (Eds.), Sand injectites: Implications for hydrocarbon exploration and production. AAPG Memoir 87. 2007: 233-244
- Cooke M.L., Simo J.A., Underwood C.A., Rijken P. Mechanical stratigraphic controls on fracture patterns within carbonates and implications for groundwater flow. *Sedimentary Geology*, 2006, 184 (3-4): 225-239. <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.11.004>
- Corbett K., Friedman M., Spang J. Fracture development and mechanical stratigraphy of Austin Chalk, Texas. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1987, 71: 17-28.
- Craddock J.P., Nuriel P., Kylander-Clark A.R.C., Hacker B.R., Luczaj J., Weinberger R. Long-term (7 Ma) strain fluctuations within the Dead Sea transform system from high-resolution U-Pb dating of a calcite vein. *GSA Bulletin*, 2021. <https://doi.org/10.1130/B36000.1>
- Davies G.R., Smith Jr.L.B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview. *AAPG Bulletin*, 2006, 90 (11): 1641-1690.
- De Boever E., Swennen R., Dimitrov L. Lower Eocene carbonate cemented chimneys (Varna, NE Bulgaria): Formation mechanisms and the (a)biological mediation of chimney growth. *Sedimentary Geology*, 2006, 185: 159-173.
- Dentzer J., Bruel D., Delescluse M., Chamot-Rooke N., Beccaletto L., Lopez S., Courrioux G., Violette S. Thermal and seismic hints for chimney type cross-stratal fluid flow in onshore basins. *Scientific Reports*, 2018, 8: 15330. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33581-x>
- Dublyansky Y.V., Klimchouk A.B., Spötl C., Tymokhina E., Amelichev G. Isotope wallrock alteration associated with hypogene karst of the Crimean Piedmont, Ukraine. *Chemical Geology*, 2014, 377: 31-44. <http://doi.org/10.1016/j.CHEMGEO.2014.04.003>
- Dubois C., Quinif Y., Baele J.M., Barriquand L., Bini A., Bruxelles L., Maire R. The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems. *Earth-Science Review*, 2014, 131: 116-148.
- Ferill D.A., Morris A.P., McGinnis R.N., Smart K.J., Wigginton S.S., Hill N.J. Mechanical stratigraphy and normal faulting. *Journal of Structural Geology*, 2017, 94: 275-302. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2016.11.010>
- Frumkin A., Gvirtzman H. Cross-formational rising groundwater at an artesian karstic basin: the Ayalon Saline Anomaly, Israel. *J. Hydrol.*, 2006, 318: 316-333.
- Goldscheider N., Mádl-Szőnyi J., Eröss A., Schill E. Review: Thermal water resources in carbonate rock aquifers. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18: 1303-1318.
- Gross M.R., G. Gutierrez-Alonso T., Bai M.A., Wacker K.B., Collingsworth Behl R.J. Influence of mechanical stratigraphy and kinematics on fault scaling relations: *Journal of Structural Geology*, 1997, 19: 171-183.
- Gross M.R., Eyal Y. Throughgoing fractures in layered carbonate rocks. *GSA Bulletin*, 2007, 119 (11/12): 1387-1404. <http://doi.org/10.1130/B26049.1>
- Homuth S., Gotz A.E., Sass I. Outcrop analogue studies for reservoir characterization of deep geothermal systems in Upper Jurassic limestone formations (South Germany). *Geophysical Research Abstracts*, 2011, 13: 1-23.
- Huntoon P.W. Large-basin groundwater circulation and paleo-reconstructions of circulation leading to uranium mineralization in Grand Canyon breccias pipes, Arizona. *The Mountain Geologist*, 1996, 33 (3). 71-84.
- Hurst A., Cartwright, J. (Eds.). Sand Injectites: Implications for Hydrocarbon Exploration and Production. *AAPG Mem.*, 2007, 87. AAPG, Tulsa.
- Hurst A., Cartwright J.A., Duranti D. Fluidization structures produced by upward injection of sand through a sealing lithology. In: Van Rensbergen P., Hillis R.R., Maltman A.J., Morley C.K. (Eds.), Subsurface sediment mobilization. *Geological Society (London). Special Publication*, 2003a, 216: 123-137.
- Hurst A., Cartwright J., Huuse M., Jonk R., Schwab A., Duranti D., Cronin B. Significance of large-scale sand injectites as long-term fluid conduits: Evidence from seismic data: *Geofluids*, 2003b, 3 (4): 263-274.

- Huuse M., Jackson C.A.-L., Van Rensbergen P., Davies R.J., Flemings P.B., Dixon R.J. Subsurface sediment remobilization and fluid flow in sedimentary basins: an overview. *Basin Research*, 2010, 22: 342-360. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2010.00488.x>
- Huuse M., Shoulders S.J., Netoff D.L., Cartwright J. Giant sandstone pipes record basin-scale liquefaction of buried dune sands in the Middle Jurassic of SE Utah. *Terra Nova*, 2005, 17: 80-85. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2004.00587.x>
- Ingebritsen S.E., Appold M.S. The physical hydrogeology of ore deposits. *Economic Geology*, 2012, 107: 559-584.
- Ingebritsen S.E., Sanford W.E. 2006. Groundwater in geologic processes. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jamveit B., Svensen H., Podladchikov Y.Y., Planke S. Hydrothermal vent complexes associated with sill intrusions in sedimentary basins. In: Breiterkreuz C., Petford N. (Eds.), Physical Geology of High-Level Magmatic Systems. *Geological Society of London, Special Publication*, 2004, 234: 233-241, <http://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.234.01.15>
- Karstens J., Müller Ph., Berndt C., Patruno S. Deep-seated focused fluid migration as indicator for hydrocarbon leads in the East Shetland Platform, North Sea Province. *Geological Society of London. Special Publications*. 2019, 494. <https://doi.org/10.1144/SP494-2019-26>
- Klimchouk A.B. Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. National Cave and Karst Research Institute, Special Paper No. 1, Carlsbad, New Mexico, 2007.
- Klimchouk A. Types and settings of hypogene karst. In: Klimchouk A., Palmer A., De Waele J., Auler A., Audra P. (Eds.), Hypogene Karst Regions and Caves of the World. Springer International Publishing AG, Cham, 2017a, pp. 1-39.
- Klimchouk A.B. Tafoni and honeycomb structures as indicators of ascending fluid flow and hypogene karstification. In: Parise M., Gabrovsek F., Kaufmann G., Ravbar N. (Eds.), Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications. *Geological Society of London, Special Publication*, 2017b, 466: 79-105. <https://doi.org/10.1144/SP466.11>
- Klimchouk A.B., Amelichev G.N., Chervyatsova O.Y., Tokarev S.V., Kiseleva D.V., Potapov S.S. Ferruginous accumulations in hypogene karst conduits of Crimean Piedmont: Evidence for a deep iron source for the Kerch-Taman iron-ore province, North Black Sea region. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 127: 104954. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.104954>
- Klimchouk A., Andrejchuk V. Breakdown development in cover beds, and landscape features induced by intrastratal gypsum karst. In: Klimchouk A.B., Lowe D.J., Cooper A.H., Sauro U. (Eds.), Gypsum karst of the World. *International Journal of Speleology*, Theme issue. 1996, 25 (3-4): 127-144.
- Laubach S.E., Olson J.E., Gross M.R. Mechanical and fracture stratigraphy. *AAPG Bulletin*, 2009, 93 (11): 1413-1426. <http://doi.org/10.1306/07270909094>
- Liu X., Flemings P.B. Passing gas through the hydrate stability zone at Hydrate Ridge, offshore Oregon. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, 241: 211-226.
- Løseth H., Gading M., Wensaas L. Hydrocarbon leakage interpreted on seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 304-319.
- Løseth H., Wensaas L., Arntsen B., Hanken N.-M., Basire C., Graue K. 1000 m long gas blow out pipes. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28: 047-1060.
- Lowe D.R. Water escape in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, 1975, 2: 57-204.
- Machel H.G. Effects of groundwater flow on mineral diagenesis, with emphasis on carbonate aquifers. *Hydrogeology Journal*, 1999, 7: 4-107.
- Moss J.L., Cartwright J. 2010. 3D seismic expression of km-scale fluid escape pipes from offshore Namibia. *Basin Res.* Vol. 22. P. 481-502.
- Ortoleva P. 1994. Geochemical self-organization. New York: Oxford University Press.
- Owen G. 1987. Deformation processes in unconsolidated sands. *Geological Society of London. Special Publication*. Vol. 29. P. 11-24. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1987.029.01.02>
- Quinif Y., Bruxelles L. 2011. L'altération de type 'fantôme de roche': processus, évolution et implications pour la karstification. *Géomorphologie*. Vol. 4. P. 349-358.
- Reynolds D.L. Fluidization as a geological process and its bearing on the problem of intrusive granites. *Am. J. of Science*, 1954, 252 (10): 577-614. <https://doi.org/10.2475/ajs.252.10.577>
- Ross J.A., Peakall J., Keevil G.M. Facies and flow regimes of sandstone-hosted columnar intrusions: Insights from the pipes of Kodachrome Basin State Park. *Sedimentology*, 2014, 61 (6): 1764-1792. <http://doi.org/10.1111/sed.12115>
- Smith Jr.L.B., Davies G.R. Structurally controlled hydrothermal alteration of carbonate reservoirs: Introduction. *AAPG Bulletin*, 2006, 90 (11): 1635-1640.
- Spötl C., Dublyansky Y., Koltai G., Honiat C., Plan L., Angerer T. Stable isotope imprint of hypogene speleogenesis: Lessons from Austrian caves. *Chemical Geology*, 2021, 572: 120209. <http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120209>
- Sun Q., Cartwright J., Wu S., Chen D. 3D seismic interpretation of dissolution pipes in the South China Sea: Genesis by subsurface, fluid induced collapse. *Marine Geology*, 2013, 337: 171-181. <http://doi.org/10.1016/J.MARGE.2013.03.002>
- Wendt K.A., Pythoud M., Moseley G.E., Dublyansky Y.V., Edwards R.L., Spötl C. Paleohydrology of southwest Nevada (USA) based on groundwater 234U/238U over the past 475 k.y. *GSA Bulletin*, 2019, 132 (3-4): 793-802. <https://doi.org/10.1130/B35168.1>

- Wenrich K.J., Sutphin H.B. Recognition of breccias pipes in Northern Arizona. *Fieldnotes*, 1988, 18 (1): 1-5.
- Wheatley D.F., Chan M.A., Sprinkel D.A. Clastic pipe characteristics and distributions throughout the Colorado Plateau: Implications for paleoenvironment and paleoseismic controls. *Sedimentary Geology*, 2016, 344: 20-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.03.027>
- Whittaker B.N., Reddish D.J. Subsidence: Occurrence, Prediction and Control. Elsevier Science Publishing Company Inc., New York, 1989.
- Worthington S.R.H., Ford D.C., Beddows P. Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution. In: Klimchouk A., Ford D., Palmer A., Dreybrodt W. (Eds.), *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000, pp. 423-432.
- Yang J., Large R.R., Bull S.W. Factors controlling free thermal convection in faults in sedimentary basins: implications for the formation of zinc-lead mineral deposits. *Geofluids*, 2004, 4: 237-247. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2004.00084.x>

Надійшла до редакції 31.01.2022

Надійшла у ревізованій формі 12.02.2022

Прийнята 14.02.2022

REFERENCES

- Andresen K.J. 2012. Fluid flow features in hydrocarbon plumbing systems: What do they tell us about the basin evolution? *Marine Geology*, 332-334: 89-108.
- Audra Ph. 2015. Explorations 2013-2014 en Algérie Tébessa et massif de l'Azrou. *Spelunca*, 137: 39-44.
- Belenitskaya G.A. 2011. "Fluid" branch of lithology: state of the art, objects, and challenges. *Uchenyye Zapiski Kazanskogo Universiteta*, 153 (4): 97-113 (in Russian).
- Braccini E., De Boer W., Hurst A., Huuse M., Vigorito M., Templeton G. 2008. Sand injectites. *Schlumberger Oilfield Review*, 20 (2): 34-49.
- Broughton P.L. 2021. Salt dissolution tectonism and spatiotemporal aspects of juxtaposed sinkholes and pseudo-sinkholes of the Foreland Alberta Basin, Canada. U. S. *Geological Survey Karst Interest Group Proceedings*: 86-96.
- Cartwright J.A., Santamarina C. 2015. Seismic characteristics of fluid escape pipes in sedimentary basins: Implications for pipe genesis. *Marine and Petroleum Geology*, 65: 12-140. <http://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.03.023>
- Cartwright J., Huuse M., Aplin A. 2007. Seal bypass systems. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 91: 1141-1166. <http://doi.org/10.1306/04090705181>
- Cathles L.M., Su Z., Chen, D. 2010. The physics of gas chimney and pockmark formation, with implications for assessment of seafloor hazards and gas sequestration. *Marine and Petroleum Geology*, 27 (1): 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.09.010>
- Chan M., Netoff D., Blakey R., Kocurek G., Alvarez W. 2007. Clastic-injection pipes and syndepositional deformation structures in Jurassic eolian deposits: Examples from the Colorado Plateau. In: A. Hurst and J. Cartwright (Eds.), *Sand injectites: Implications for hydrocarbon exploration and production*. AAPG Memoir 87: 233-244.
- Cooke M.L., Simo J.A., Underwood C.A., Rijken P. 2006. Mechanical stratigraphic controls on fracture patterns within carbonates and implications for groundwater flow. *Sedimentary Geology*, 184(3-4): 225-239. <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.11.004>
- Corbett K., Friedman M., Spang J. 1987. Fracture development and mechanical stratigraphy of Austin Chalk, Texas. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 71: 17-28.
- Craddock J.P., Nuriel P., Kylander-Clark A.R.C., Hacker B.R., Luczaj J., Weinberger R. 2021. Long-term (7 Ma) strain fluctuations within the Dead Sea transform system from high-resolution U-Pb dating of a calcite vein. *GSA Bulletin*. <https://doi.org/10.1130/B36000.1>
- Davies G.R., Smith Jr.L.B. 2006. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview. *AAPG Bulletin*, 90 (11): 1641-1690.
- De Boever E., Swennen R., Dimitrov L. 2006. Lower Eocene carbonate cemented chimneys (Varna, NE Bulgaria): Formation mechanisms and the (a)biological mediation of chimney growth. *Sedimentary Geology*, 185: 159-173.
- Dentzer J., Bruel D., Delescluse M., Chamot-Rooke N., Beccalotto L., Lopez S., Courrioux G., Violette S. 2018. Thermal and seismic hints for chimney type cross-stratal fluid flow in onshore basins. *Scientific Reports*, 8: 15330. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33581-x>
- Dublyansky Y.V., Klimchouk A.B., Spötl C., Tymokhina E., Amelichev G. 2014. Isotope wallrock alteration associated with hypogene karst of the Crimean Piedmont, Ukraine. *Chemical Geology*, 377: 31-44. <http://doi.org/10.1016/j.CHEMGEO.2014.04.003>
- Dubois C., Quinif Y., Baele J.M., Barriquand L., Bini A., Bruxelles L., Maire R. 2014. The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems. *Earth-Science Reviews*, 131: 116-148.
- Ferill D.A., Morris A.P., McGinnis R.N., Smart K.J., Wigginton S.S., Hill N.J. 2017. Mechanical stratigraphy and normal faulting. *Journal of Structural Geology*, 94: 275-302. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2016.11.010>
- Frumkin A., Gvirtzman H. 2006. Cross-formational rising groundwater at an artesian karstic basin: the Ayalon Saline Anomaly, Israel. *J. Hydrol*, 318: 316-333.

- Geological Glossary* (In 2 volumes). 1973. Paffengolts K.N. (Ed.). Moscow: Nedra (in Russian).
- Geological Glossary* (In 3 volumes). 2010-2012. Petrov O.V. (Ed.). St.-Petersburg: VSEGEI (in Russian).
- Goldscheider N., Mádl-Szönyi J., Eröss A., Schill E. 2010. Review: Thermal water resources in carbonate rock aquifers. *Hydrogeology Journal*, 18: 1303-1318.
- Gross M. R., G. Gutierrez-Alonso T. Bai M. A. Wacker K.B. Collingsworth Behl R.J. 1997. Influence of mechanical stratigraphy and kinematics on fault scaling relations: *Journal of Structural Geology*, 19: 171-183.
- Gross M.R., Eyal Y. 2007. Throughgoing fractures in layered carbonate rocks. *GSA Bulletin*, 119 (11/12): 1387-1404. <http://doi.org/10.1130B26049.1>
- Homuth S., Gotz A.E., Sass I. 2011. Outcrop analogue studies for reservoir characterization of deep geothermal systems in Upper Jurassic limestone formations (South Germany). *Geophysical Research Abstracts*, 13: 1-23.
- Huntoon P.W. 1996. Large-basin groundwater circulation and paleo-reconstructions of circulation leading to uranium mineralization in Grand Canyon breccias pipes, Arizona. *The Mountain Geologist*, 33 (3): 71-84.
- Hurst A., Cartwright J., Huuse M., Jonk R., Schwab A., Duranti D., Cronin B. 2003a, Significance of large-scale sand injectites as long-term fluid conduits: Evidence from seismic data. *Geofluids*, 3 (4): 263-274.
- Hurst A., Cartwright J.A., Duranti D. 2003b. Fluidization structures produced by upward injection of sand through a sealing lithology. In: Van Rensbergen P., Hillis R.R., Maltman A.J., Morley C.K. (Eds.), *Subsurface sediment mobilization. Geological Society (London). Special Publication*, 216: 123-137.
- Hurst A., Cartwright, J. (Eds.) 2007. Sand Injectites: Implications for Hydrocarbon Exploration and Production. *AAPG Mem.*, 87. AAPG, Tulsa.
- Huuse M., Jackson C.A.-L., Van Rensbergen P., Davies R.J., Flemings P.B., Dixon R.J. 2010. Subsurface sediment remobilization and fluid flow in sedimentary basins: an overview. *Basin Research*, 22: 342-360. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2010.00488.x>
- Huuse M., Shoulders S.J., Netoff D.I., Cartwright J. 2005. Giant sandstone pipes record basin-scale liquefaction of buried dune sands in the Middle Jurassic of SE Utah. *Terra Nova*, 17: 80-85. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2004.00587.x>
- Ingebritsen S.E., Sanford W.E. 2006. *Groundwater in geologic processes*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ingebritsen S.E., Appold M.S. 2012. The physical hydrogeology of ore deposits. *Economic Geology*, 107: 559-584.
- Jamveit B., Svensen H., Podladchikov Y.Y., Planke S. 2004. Hydrothermal vent complexes associated with sill intrusions in sedimentary basins. In: Bretkreuz C., Petford N. (Eds.), *Physical Geology of High-Level Magmatic Systems. Geological Society of London. Special Publications*, 234: 233-241, <http://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.234.01.15>
- Karstens J., Müller Ph., Berndt C., Patruno S. 2019. Deep-seated focused fluid migration as indicator for hydrocarbon leads in the East Shetland Platform, North Sea Province. *Geological Society of London. Special Publications*, 494. <https://doi.org/10.1144/SP494-2019-26>
- Khain V.E. 1973. *General Geotectonics*. Moscow: Nedra (in Russian).
- Klimchouk A. 2017a. Types and settings of hypogene karst. In: Klimchouk A., Palmer A., De Waele J., Auler A., Audra P. (Eds.), *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. Springer International Publishing AG, Cham, pp. 1-39.
- Klimchouk A., Andrejchuk V. 1996. Breakdown development in cover beds, and landscape features induced by intrastratal gypsum karst. In: Klimchouk A.B., Lowe D.J., Cooper A.H., Sauro U. (Eds.), *Gypsum karst of the World. International Journal of Speleology*, Theme issue, 25 (3-4): 127-144.
- Klimchouk A.B. 2007. Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. National Cave and Karst Research Institute, Special Paper No. 1, Carlsbad, New Mexico.
- Klimchouk A.B. 2017a. The development of the theory of hypogene karst genesis: scientific and practical implications. *Visnyk NAN Ukrainy*, 11: 1-19. doi: 10.15407/visn2017.11.009 (in Ukrainian).
- Klimchouk A.B. 2017b. Tafoni and honeycomb structures as indicators of ascending fluid flow and hypogene karstification. In: Parise M., Gabrovsek F., Kaufmann G., Ravbar N. (Eds.), *Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications. Geological Society of London., Special Publications*, 466: 79-105. <https://doi.org/10.1144/SP466.11>
- Klimchouk A.B., Amelichev G.N., Chervyatsova O.Y., Tokarev S.V., Kiseleva D.V., Potapov S.S. 2021. Ferruginous accumulations in hypogene karst conduits of Crimean Piedmont: Evidence for a deep iron source for the Kerch-Taman iron-ore province, North Black Sea region. *Marine and Petroleum Geology*, 127: 104954. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.104954>
- Klimchouk A.B., Timokhina E.I., Amelichev G.N., Dublyansky V.N., Spoetl C. 2013. Hypogene Karst of the Crimean Piedmont and its Geomorphological Role. Simferopol: DIP (in Russian).
- Kropotkin P.N. 1986. Degassing of Earth and the origin of hydrocarbons. *Zhurnal Vsesojuznogo Khimicheskogo Obshchestva*, 31 (5): 481-587 (in Russian).
- Laubach S.E., Olson J.E., Gross M.R. 2009. Mechanical and fracture stratigraphy. *AAPG Bulletin*, 93 (11): 1413-142. <http://doi.org/10.1306/07270909094>
- Leonov Y.G., Volozh Y.A. (Eds.) 2004. *Sedimentary Basins: Methods of Study, Structure and Evolution*. Moscow: Nauchnyy Mir (in Russian).
- Liu X., Flemings P.B. 2006. Passing gas through the hydrate stability zone at Hydrate Ridge, offshore Oregon. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 241: 211-226.

- Løseth H., Gading M., Wensaas L. 2009. Hydrocarbon leakage interpreted on seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, 26: 1304-1319.
- Løseth H., Wensaas L., Arntsen B., Hanken N.-M., Basire C., Graue K. 2011. 1000 m long gas blow out pipes. *Marine and Petroleum Geology*, 28: 1047-1060.
- Lowe D.R. 1975. Water escape in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, 22: 157-204.
- Lukin A.E. 1989. Lithogeodynamic factors of oil and gas accumulation in aulacogen basins. Extended abstract of Doctor's thesis. Kyiv (in Russian).
- Lukin A.E. 2004. About cross-formational fluid-conducting systems in oil-bearing basins. *Geologičnij žurnal*, 3 (309): 35-45 (in Russian).
- Lukin A.E. 2014. Fluid-induced lithogenesis — the most important direction of lithological research in XXI century. *Geologičnij žurnal*, 4 (349): 27-42 (in Russian).
- Lukin A.E. 2018. Consedimental processes of the Earth' deep degassing and their role in the formation of rock-forming basins. In: Shestopalov V.M. (Ed.), *Essays on the Earth degassing*. Kyiv (in Russian).
- Machel H.G. 1999. Effects of groundwater flow on mineral diagenesis, with emphasis on carbonate aquifers. *Hydrogeology Journal*, 7: 94-107.
- Makhlaev L.V., Golubeva I.I. 2001. Fluidizates require attention. *Priroda (Nature)*, 9: 59-68 (in Russian).
- Mamedov P.Z., Guliev I.S. 2003. Sub-vertical geological bodies in the sedimentary cover of the South-Caspian Depression. *Izvestiya Akademii Nauk Azerbaydzhana. Nauki o Zemle*, 3: 139-146 (in Russian).
- Moss J.L., Cartwright J. 2010. 3D seismic expression of km-scale fluid escape pipes from offshore Namibia. *Basin Res*, 22: 481-502.
- Ortoleva P. 1994. *Geochemical self-organization*. New York: Oxford University Press.
- Owen G. 1987. Deformation processes in unconsolidated sands. *Geological Society of London. Special Publication*, 29: 11-24. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1987.029.01.02>
- Pospelov G.L. 1962. Structure and development of filtrating hydrothermal ore-forming systems. *Geologiya i Geofizika*, part 1, 11: 28-40; part 2, 12: 40-57 (in Russian).
- Pospelov G.L. 1963. Geological background of physics of ore-controlling fluid conductors. Геологические предпосылки к физике рудоконтролирующих флюидопроводников. *Geologiya i Geofizika*, 3: 18-38 (in Russian).
- Quinif Y., Bruxelles L. 2011. Laltération de type 'fantôme de roche': processus, évolution et implications pour la karstification. *Géomorphologie*, 4: 349-358.
- Reynolds D.L. 1954. Fluidization as a geological process and its bearing on the problem of intrusive granites. *Am. J. of Science*, 252 (10): 577-614. <https://doi.org/10.2475/ajs.252.10.577>
- Ross J.A., Peakall J., Keevil G.M. 2014. Facies and flow regimes of sandstone-hosted columnar intrusions: Insights from the pipes of Kodachrome Basin State Park. *Sedimentology*, 61 (6): 1764-1792. <http://doi.org/10.1111/sed.12115>
- Shestopalov V.M., Lukin A.E., Zgonnik V.A., Makarenko A.N., Larin N.V., Boguslavskiy A.S. 2018. *Essays on the Earth degassing*. Kyiv (in Russian).
- Smith Jr.L.B., Davies G.R. 2006. Structurally controlled hydrothermal alteration of carbonate reservoirs: Introduction. *AAPG Bulletin*, 90 (11): 1635-1640.
- Spötl C., Dublyansky Y., Koltai G., Honiat C., Plan L., Angerer T. 2021. Stable isotope imprint of hypogene speleogenesis: Lessons from Austrian caves. *Chemical Geology*, 572: 120209, <http://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120209>
- Sun Q., Cartwright J., Wu S., Chen D. 2013. 3D seismic interpretation of dissolution pipes in the South China Sea: Genesis by subsurface, fluid induced collapse. *Marine Geology*, 337: 171-181. <http://doi.org/10.1016/J.MARGEO.2013.03.002>
- Wendt K.A., Pythoud M., Moseley G.E., Dublyansky Y.V., Edwards R.L., Spötl C. 2019. Paleohydrology of southwest Nevada (USA) based on groundwater 234U/238U over the past 475 k. y. *GSA Bulletin*, 132 (3-4): 793-802. <https://doi.org/10.1130/B35168.1>
- Wenrich K.J., Sutphin H.B. 1988. Recognition of breccias pipes in Northern Arizona. *Fieldnotes*, 18 (1): 1-5.
- Wheatley D.F., Chan M.A., Sprinkel D.A. 2016. Clastic pipe characteristics and distributions throughout the Colorado Plateau: Implications for paleoenvironment and paleoseismic controls. *Sedimentary Geology*, 344: 20-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.03.027>
- Whittaker B.N., Reddish D.J. 1989. *Subsidence: Occurrence, Prediction and Control*. Elsevier Science Publishing Company Inc., New York.
- Worthington S.R.H., Ford D.C., Beddows P. Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution. In: Klimchouk A., Ford D., Palmer A., Dreybrodt W. (Eds.), *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000, pp. 423-432.
- Yang J., Large R.R., Bull S.W. 2004. Factors controlling free thermal convection in faults in sedimentary basins: implications for the formation of zinc-lead mineral deposits. *Geofluids*, 4: 237-247. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2004.00084.x>
- Yapaskurt O.V. 2005. Aspects of the theory of post-sedimentation lithogenesis. *Litosfera*, 3: 3-30 (in Russian).

Received 31.01.2022

Received in revised form 12.02.2022

Accepted 14.02.2022

O.B. Klimchouk

Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: klimchouk.2020@gmail.com

THROUGHGOING FLUID-CONDUCTING STRUCTURES: CONCEPTUALIZATION,
TERMINOLOGY, TYPES, PROPERTIES, AND THE ROLE IN FLUID CIRCULATION

In this paper the review and analysis of global data on throughgoing fluid-conducting structures is performed, the problematic issues of related concepts and terminology are considered, typification of structures by various criteria is proposed and their role in fluid circulation and in lithogenesis and evolution of sedimentary basins is accessed. Such structures are ubiquitous and are an integral part of the drainage system of the upper crust, although the intensity of their distribution and impact on fluid circulation vary widely and increase drastically in certain geological and geodynamic conditions. At the local and subregional scales, throughgoing structures and related phenomena show uneven, clustered distribution.

The key role of throughgoing structures in fluid circulation, including the migration of hydrocarbons and pollutants, is determined by their intersecting and throughgoing nature with respect to layered inhomogeneities, including sealing (low permeability) horizons, and by usually much higher permeability than that of the host rocks. The vertical nature of structures and localized vertical fluid flow across lateral lithological and hydrodynamic boundaries cause the formation of thermal and geochemical anomalies and disequilibrium of the water-rock system, accompanied by the interaction of conduit fluids with host rocks and reservoirs and by alteration of the rocks that contain them. This determines the leading role of throughgoing structures in superimposed lithogenesis and ore mineralization.

The fluid conductivity of throughgoing structures is variable over time because it depends on their origin, stages of their formation and secondary changes. In this regard, the comparison of this ability between morphogenetic varieties of throughgoing structures is generally difficult, although the most effective in this respect are structures of karstic origin. For structures of fluidodynamic type, the greatest permeability and intensity of fluid flows through the conduits are characteristic of the periods of their formation and immediately after them, as well as of the periods of activation, which are usually associated with tectonic events.

Keywords: throughgoing fluid-conducting structures; fluid exchange; typology of throughgoing structures; superimposed lithogenesis.